

解 説

光 通 信 用 光 部 品

小 林 盛 男

NTT 電気通信研究所 〒319-11 茨城県那珂郡東海村白方白根 162

(1986年1月8日受理)

Optical Components for Optical Communications

Morio KOBAYASHI

NTT Electrical Communications Laboratories,
162, Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-11

1. はじめに

低損失光ファイバおよび半導体レーザーの誕生から十数年を経過し、すでに幾つかの光通信システムが実用化されている¹⁾。わが国においては、NTTにより数年前から都市内の局間中継および近距離市外中継に適用する中小容量光伝送システム(ビットレート: 1.5, 6.3, 32, 100 Mb/s)が実用化され、さらに1985年には総延長3400 kmに達する日本縦貫の大容量光伝送システム(ビットレート: 400 Mb/s)が実用化された²⁾。諸外国においても同様に中継系への光伝送方式の導入が進められている。このような状況にあって、技術面では超長距離・超大容量を目指した研究が絶え間なく続けられている。さらに、光技術は光伝送システムだけでなく交換システムへの適用も検討が開始されている。また、光伝送方式の適用分野については、中継系から加入者系、ローカルエリアネットワーク(LAN)まで拡がりはじめている。

本解説では、新しい光伝送システムや光交換システムを実現するための光部品および光伝送方式の適用分野を拡大するための光部品について紹介する。ここでは、発光・受光素子については他の解説を参照していただくこととし、それ以外の光部品について発展途上にあるものを中心に概説する。

2. 光部品の技術動向

光信用光部品を形態によって分類し、その技術動向の概要を述べる。

光信用光部品は、表1に示すように、パルク形、フ

アイバ形、導波形に大別できる。パルク形は、従来のレンズ、プリズム、干渉膜フィルタなどの個別光学部品を光通信に適するように微小化や性能向上を図り、それらを組み合わせて製作した部品である。従来の光学部品製作技術を活用して短期間で新しい部品を開発できる長所があった。ファイバ形は、光ファイバを素材とした部品であり、光ファイバと接続が容易で、挿入損が小さいという特長がある。導波形は、光導波路の導波作用を基本とした平面光回路であり、光導波回路や光集積回路といわれているものである³⁾。その特徴は、新機能、機能の高度化・安定化・複合化、小型化、量産性などにある。

光部品を形態分類でとらえたとき、その技術動向は図1のようにみることができる。すなわち、パルク形から導波形へ、あるいはファイバ形への移行である。その狙いは、一つは新機能の創出と性能の高度化・安定化であり、一つは量産化による光部品の経済化である。部品製作技術の成熟度は、パルク形が最も高く、次いでファイバ形、導波形の順である。そのため、これまでパルク形に頼らざるをえないのが実情であった。しかし、光周波数分割多重伝送方式やコヒーレント光伝送方式のような新しい光伝送方式ではきわめて高性能かつ高安定な光部品を必要としており、パルク形では対応できず、ファイバ形や導波形の光部品が不可欠になっている。また、加入者系光伝送システムにおける光合分波器のように大量に使用される光部品については、量産の難しいパルク形から量産に適した導波形への移行が必須になっていく。このような状況において、ファイバ形および導波形

表 1 光部品の形態と特徴

形 態	構成要素	基 础 技 術	大 き さ	損 失	特 徵	部 品 例
バルク形	個別光学部品	・個別部品の組合せ ・幾何光学	cm × cm オーダー	0.5~2 dB/個	・低挿入損 ・既存光学技術で製作可能 ・形状大 ・安定性難	コネクタ、光合分波器、光減衰器など
ファイバ形	光ファイバ	・光ファイバ加工 ・波動光学	mm × cm オーダー	0.1~1 dB/個	・低挿入損 ・ファイバとの整合性良 ・機能限定	波長板、光カッピラ、偏光子など
導波形	光導波路	・薄膜形成・加工 ・波動光学	μm × mm オーダー	(1~3 dB) + 結合損/個所	・安定性 ・小型・軽量 ・量産性 ・非線形性大	光変調器、光スイッチ、光アクセサなど

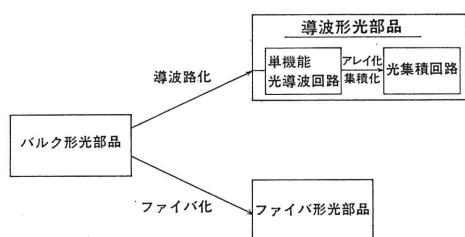


図 1 光部品の技術動向

の光部品は、実用レベルの性能をもつものが報告されて來ており、今後研究開発がますます活発化すると考えられる。

3. 光伝送システム用光部品

伝送方式別に光部品を概観する。ここでは、伝送方式を、すでに一部実用化されている光強度変調/直接検波伝送方式と、現在研究開発が盛んになっている光周波数分割多重伝送方式およびコヒーレント光伝送方式に大別する。

3.1 光強度変調/直接検波伝送方式用光部品^{4,5)}

光強度変調/直接検波伝送方式の基本構成は、図 2 に示すように、電気-光変換の発光素子(半導体レーザー、

LED)、光ファイバ、光-電気変換の受光素子(APD, pin PD)からなる。発光素子の光強度を直接変調し、受光素子で直接検波するという使いやすい技術を利用しているので、構成が簡単で信頼性の高い光伝送方式になっている。発光・受光素子以外には、光コネクタと光レベル調整用の光減衰器が基本部品である。そのほかに、半導体レーザー高速変調時には光アイソレータ⁶⁾が用いられる。

現在、この伝送方式の目指すところは、一つは中継系での伝送容量の増大であり、他の一つは適用領域の拡大である。これらを達成するために各種の光部品が研究されている。

3.1.1 中継系大容量化のための光部品(単一モード系)

伝送容量を増大する手段として、超高速変調の方法と波長分割多重化の方法^{7,8)}が検討されている。これらでは单一モードファイバが用いられるため光部品も单一モード系に適したものが必要である。

超高速変調の方法では、発光素子および受光素子の広帯域化が著しく進んでいる。寄生容量を低減した InGaAsP 半導体レーザーで、波長 1.3 μm で 15 GHz の変調帯域が得られている⁹⁾。これに対応して、受光素子も波

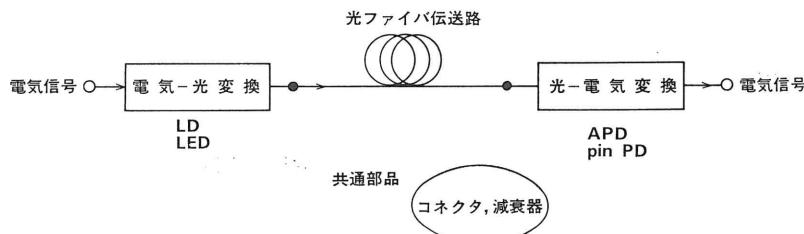


図 2 光強度変調/直接検波伝送方式の基本構成

長 $1.3\mu\text{m}$ で 20GHz の帯域をもつ InGaAs PD が報告されている¹⁰⁾。また、半導体レーザーの変調帯域を拡げる方法のほかに、外部変調器を用いて広帯域化する方法も研究されている。LiNbO₃ 導波形光変調器を使って、波長 $1.56\mu\text{m}$ 、ビットレート 4Gb/s 、伝送距離 117km の伝送実験が行なわれた¹¹⁾。

波長分割多重化の方法では、図3に示すような回折格子によるバルク形光合分波器を用いて、チャネル数10、チャネル間隔 1.35nm 、各チャネルのビットレート 2Gb/s 、伝送距離 68.8km 、波長帯 $1.5\mu\text{m}$ の合波実験¹²⁾が行なわれており、今後の進展が注目される。

3.1.2 適用領域拡大のための光部品（多モード系）

光強度変調/直接検波伝送方式の加入者系光システムおよびローカルエリアネットワーク（LAN: local area network）への適用が本格化している。加入者系光システムは局と各家庭を光伝送方式で結ぶものであり、LANは限定された地域内（ビル内、構内など）にある情報機器類を光伝送方式で接続するものである。これらでは、当面、光ファイバ接続が容易で、伝送網を構築しやすい多モード光ファイバが使用されるので、光部品も多モード系のものが必要である。

(1) 加入者系光システム^{13,14)}

現在、NTTでは三鷹地区でモデルシステムによる試行サービスが行なわれている。ここでは、発光素子、受光素子、光合分波器、光コネクタなどの光部品が使われているが、加入者系光システムの本格導入にはこれらの部品の経済化が大きな課題になっている。

モデルシステムで使われているバルク形の光合分波器を図4に示す¹³⁾。波長 $0.81, 0.89, 1.2, 1.3\mu\text{m}$ の4波

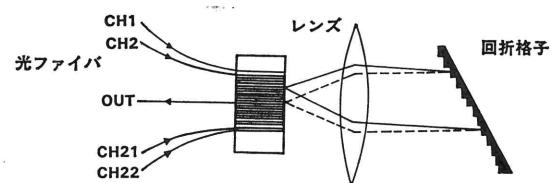
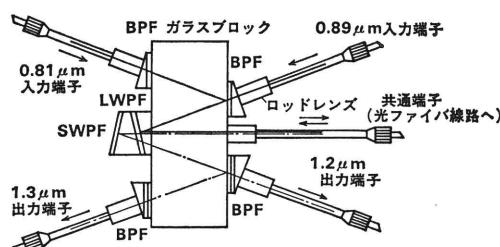


図3 回折格子による光合分波器



BPF: 帯域通過フィルタ
SWPF: 短波長帯通過フィルタ
LWPF: 長波長帯通過フィルタ

図4 4波多重用光合分波器

用で、2波ずつの双方向伝送を行なっている。挿入損が $1.5\sim3\text{dB}$ 、遠端クロストーク -40dB 以下と優れた性能である。最近、バルク形光合分波器の構造を簡単化・小型化するとともに受発光素子を搭載して使いやすくした光合分波器モジュールの開発が進められている¹⁵⁾。また、抜本的な生産性向上による経済化を狙いとした導波形の光合分波器の開発も行なわれている。図5は石英系導波路/Si を用いた4波用光合分波器である¹⁶⁾。挿入損 $3.5\sim4\text{dB}$ 、遠端クロストーク -30dB 以下、寸法 $10\times20\text{ mm}$ である。さらに受発光素子を含めたモジュ

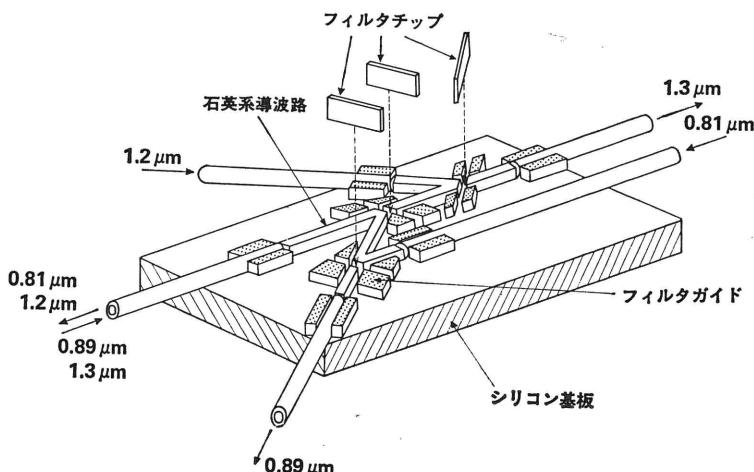


図5 導波形光合分波器

ール化が進んでいる。

加入者系光システム用光部品は、今後とも構造の簡素化、製作プロセスの自動化・簡易化による経済化が図られよう。可能な限り導波路化が必要であろう。

(2) LAN^{17,18)}

LAN の網構成には、スター網、ループ網、バス網がある。スター網では低損失で分配偏差が少なく入出力ポート数の多いスタークラップラが必要である。導波形およびファイバ形のスタークラップラが開発され、良好な特性を示している。図6は、100×100 の導波形スタークラップラである¹⁹⁾。ガラス導波層（50 μm 厚×6 mm 幅×100 mm 長）の端面に光ファイバ（外径 60 μm, コア径 50 μm）を接続し、過剰損失 5.2 dB, 分配偏差 ±0.5 dB が得られている。図7は100×100 のファイバ形スタークラップラである²⁰⁾。光ファイバ束を融着テーパ化した後ミキシングロッドに接続した構造であり、過剰損失 3.2 dB, 分配偏差 ±0.37 dB 以下と良好である。

ループ網、バス網では、伝送路から光信号を受け取り、伝送路に光信号を送出するための光アクセッサが重要な光部品である。図8は石英系導波形アクセッサである²¹⁾。分岐部と合流部はバルク形のビームスプリッタと同じ働きをする。分岐、合流の過剰損は 2~3 dB で、バルク形の光アクセッサの特性に匹敵する。光回路の大きさは 3×20 mm と小さい。同種の導波形光アクセッサが T1 拡散ガラス導波路を使って実現されている²²⁾。

LAN 用光部品では、実用レベルの導波形およびファイバ形の光部品が出現しており、今後の使用状況が注目される。

3.2 光周波数分割多重伝送方式用光部品

数~10 チャネルの波長分割多重伝送について 3.1 項で述べたが、さらにチャネル間隔を GHz オーダーにまで狭めて飛躍的な高密度多重を行なう光周波数分割多重 (FDM; frequency division multiplexing) 伝送の研究が始まっている²³⁾。たとえば、現時点で実用可能なチャネル間隔とされている 20 nm 間隔の波長分割多重と

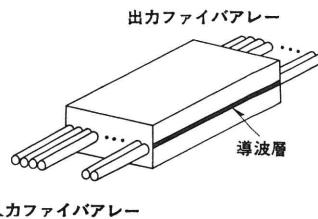


図6 導波形 100×100 スタークラップラ

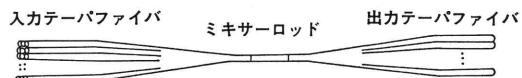


図7 ファイバ形 100×100 スタークラップラ

比べて、チャネル間隔 10 GHz の光 FDM 伝送方式では多重化密度が 260 倍にも達し、いかに効果が大きいかわかる。

光 FDM 伝送方式の実現には、発光素子の周波数安定化、スペクトル純化とともに GHz オーダー用の光合分波器の開発が課題である。このような光合分波器として、図9(a)に示すような Mach-Zehnder 型のものが提案され、その機能が確認されている^{24,25)}。二つのビームスプリッタ間を長さの異なる単一モード偏波保持光ファイバで接続する。PZT 位相シフタは温度や振動などの外乱に対して安定動作を保持するためのものである。

図において、ポート 1→3 とポート 2→3 の透過率 T_{13} と T_{23} は、次式で表わされる。

$$\begin{aligned} T_{13} &= \cos^2(2\pi n f_1 \Delta l / c) \\ T_{23} &= \sin^2(2\pi n f_2 \Delta l / c) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 n : 光ファイバの屈折率, f_1, f_2 : 光の周波数, Δl : ファイバ長の差, c : 光速, である。そこで,

$$f_2 - f_1 = c / (2n\Delta l) \quad (2)$$

になるように Δl を設定すれば、 $T_{13}=1$, $T_{23}=1$ となり、 f_1 と f_2 の光が合波されてポート 3 から出力される。実験では、 $\Delta l \approx 1 \text{ cm}$, 波長 1.52 μm で、チャネル間隔 11 GHz, 消光比 11 dB, 插入損 1.8 dB が得られている。この部品は可逆であるから、ポート 3 から f_1 と f_2

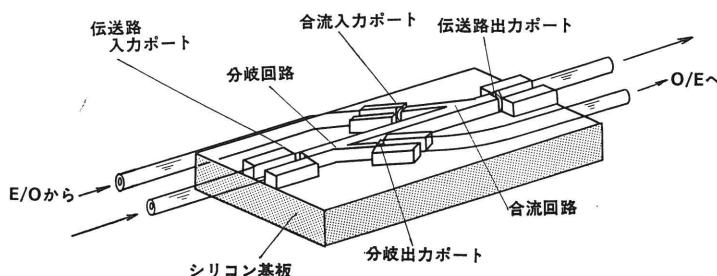


図8 導波形光アクセッサ

の合波された光を入力すれば、 f_1 の光はポート 1 から、 f_2 の光はポート 2 から出力され、分波器として機能する。

図 9(b)のように光合分波器を継続接続することにより多チャネルの合分波が可能である。今後は、光ファイバの代りに光導波路を使ってコンパクトな多チャネルの合分波器の開発が進められるであろう。

なお、光 FDM は、光強度変調/直接検波伝送方式にも、コヒーレント光伝送方式にも適用可能である。

3.3 コヒーレント光伝送方式用光部品²⁶⁻²⁹⁾

コヒーレント光伝送方式の基本構成の一例を図 10 に示す³⁰⁾。送信側ではコヒーレントな光搬送波の振幅、周波数または位相をコヒーレント変調し、受信側では光ヘテロダイン検波あるいはホモダイン検波を行なう。ディジタルの振幅、周波数、位相変調の ASK (amplitude shift keying), FSK (frequency shift keying), PSK (phase shift keying) とヘテロダイン検波、ホモダイン検波の組合せによる受信感度の改善の理論結果を、光強度変調/直接検波を基準にして、図 11 に示す。コヒーレント光伝送方式では、従来の光強度変調/直接検波に比べて 10~34 dB の感度の改善が期待できる。損失 0.2 dB/km (波長 1.5 μm) の光ファイバを使えば 50~170 km も伝送距離が延長されることになり、これがコヒーレント光伝送方式開発の動機となっている。

コヒーレント光伝送方式における技術上の課題には、光源のスペクトル幅狭く化と周波数の安定化、高速・高効率変調法、偏波制御、光位相ロックループなどがある。

(1) 光 源

実験では He-Ne レーザー (波長 1.52 μm) と半導体レーザー (波長 1.3 μm, 1.5 μm) が用いられているが、実用上は小型で長寿命の半導体レーザーが望ましい。しかし、半導体レーザーのスペクトル幅はコヒーレント光伝送で必要な 1 MHz 以下に対して 10~50 MHz とまだ

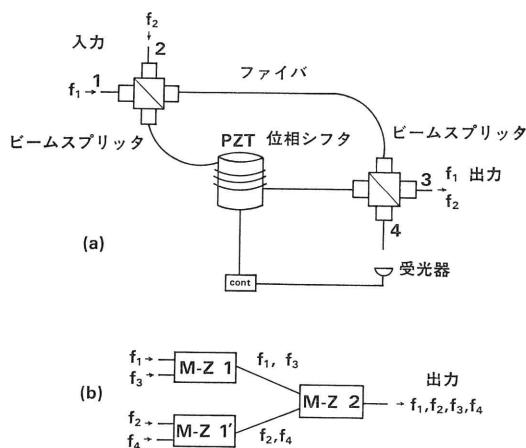


図 9 光 FDM 用合分波器

かなり広く、また周波数の安定性も悪い。スペクトル幅を狭くするためには共振器の Q 値を高める必要があり、レーザー共振器長を長くする方法と外部共振器を付加する方法が検討されている。周波数安定化には、周波数ゆらぎをレーザーの温度や駆動電流にフィードバックする方法が研究されている。

(2) 光変調器

半導体レーザーを用いた場合、FSK には直接変調が、また PSK には外部変調が用いられる。ASK には直接変調と外部変調の両方が用いられている。

PSK で使用されている導波形光位相変調器の一例を図 12 に示す³¹⁾。Ti 拡散 LiNbO₃ 光導波路に信号電圧を印加し、電気光学効果による屈折率変化を利用して位相変調する。波長 1.3 μm において駆動電圧 6 V、変調帯域 3 GHz が得られている。

(3) 偏波制御回路

効率良くコヒーレント検波するには、信号光と局部発振光の偏波状態を整合させる必要がある。そのために、①偏波保持光ファイバを用いる方法、②受信端で偏波制御する方法、③直交偏波信号を別々に受信し、電気回路

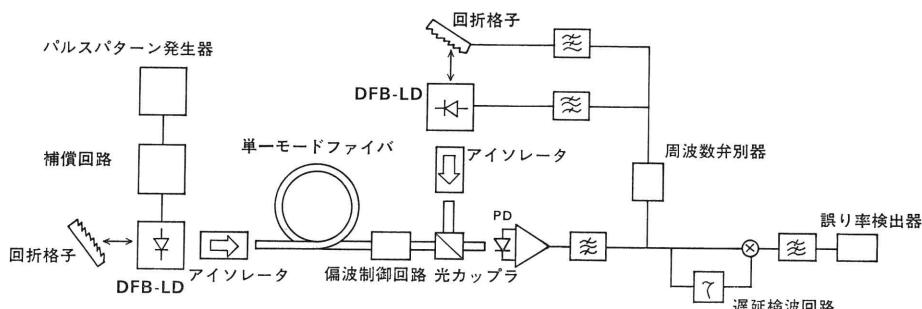


図 10 コヒーレント光伝送方式の構成例

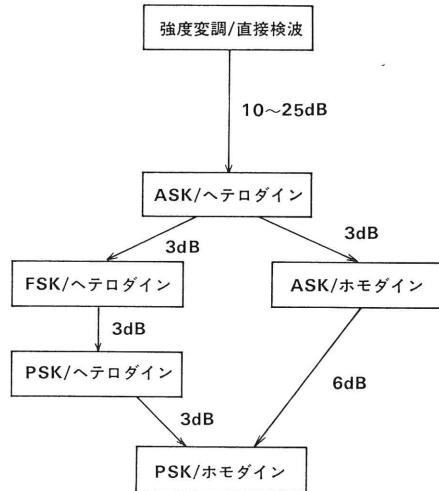
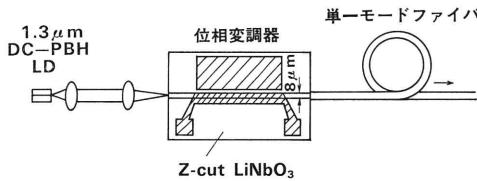


図 11 変復調方式と受信感度の関係

図 12 LiNbO₃ 導波形光位相変調器

で合成する方法が研究されている。

偏波保持光ファイバ(单一モード)には種々の構造のものが提案されているが、たとえばストレスによる複屈折を利用した PANDA ファイバでは波長 $1.57 \mu\text{m}$ で損失 0.25 dB/km 、偏波保持のクロストーク $-29 \text{ dB}/2.4 \text{ km}$ が達成されている³²⁾。

通常の真円コア光ファイバ(单一モード)を使っても海底や室内のように温度や圧力などの環境状況の変化が少ない場合には、偏光状態の乱れがゆっくりしていることが確かめられている^{33,34)}。海底に布設した 10 km ファイバで、楕円偏光の主軸角変動が 20 度/ 10 分、楕円率 [$=\tan^{-1}$ (短軸/長軸のパワー比)] の変動が 6.2 度/ 10 分以下が観測された。このような事実から、実験では取り扱いやすく経済的な真円コア光ファイバを使用し、受信端で偏波制御する方法が用いられている。偏波制御法には、① $1/4$ および $1/2$ 波長板を機械的に回転する方法³⁵⁾、②光ファイバに側圧を加えたときに生じる複屈折を利用する方法³⁶⁾、③LiNbO₃ の電気光学効果を利用する方法^{37,38)}、④光ファイバの Faraday 回転を利用する方法³⁹⁾、⑤光ファイバの曲げによって生ずる複屈折を利用する方法⁴⁰⁾が提案されている。

実験でよく利用されている⑤の方法を図 13 に示す。

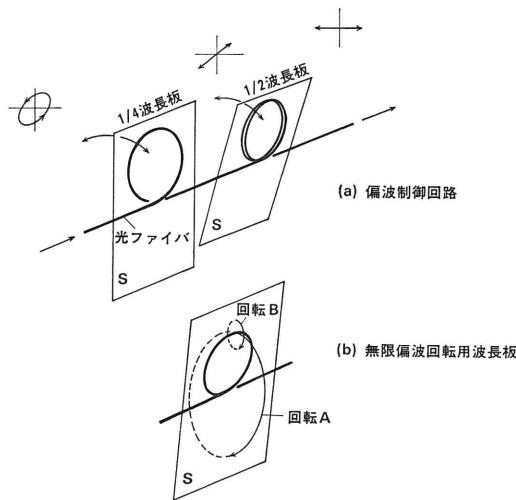


図 13 ファイバ形偏波制御回路

波長板に必要な複屈折は、図(a)に示すように、光ファイバをコイル状にしたときに発生する内部応力によって得ている。曲げ直径と巻数を調節することにより $1/4$ および $1/2$ 波長板が実現される。 $1/4$ 波長板の面 S を調整して入射信号光の楕円偏光を直線偏光に変換し、続いて $1/2$ 波長板の面 S を調整して所定の方向の直線偏光にする。このようにして偏波を制御できるが、実際には、一方向に連続した無限偏波回転を制御しなければならない場合がある。従来は光ファイバのねじれのため波長板を無限に回転することはできなかったが、最近図(b)のように面 S の回転 A とともに光ファイバにもそれ自身の軸を中心回転 B を与えることによりねじれが生じず無限回転できることが示された^{41,42)}。現在のところ、偏波無限回転の制御ができるのは、この方法と上記①の方法だけである。

(4) 光ファイバカップラ^{43,44)}

信号光と局部発振光の混合に使われる光ファイバカップラを図 14 に示す。(a)は融着型光カップラである⁴³⁾。2 本の光ファイバを融着延伸した構造である。伸延の程度によって結合比率を $0\sim100\%$ に変えられる。真円コア光ファイバを使った光カップラの挿入損は 0.1 dB 以下と非常に小さい。(b)は研磨型光カップラである⁴⁵⁾。石英ガラスブロックの円弧状溝の中に埋め込んだ光ファイバをコア部近傍まで研磨した後、二つのガラスブロックを重ね合わせた構造である。マイクロメータによってガラスブロックを横方向に動かして結合比率を $0\sim100\%$ に調整することができる。真円コア光ファイバを使った光カップラの挿入損は 0.2 dB 以下と良好である。

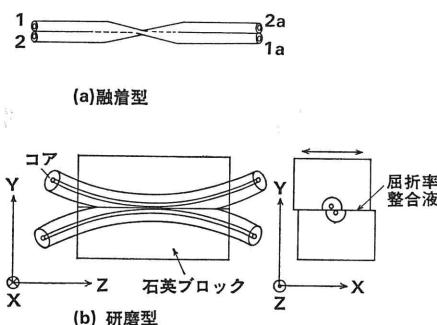


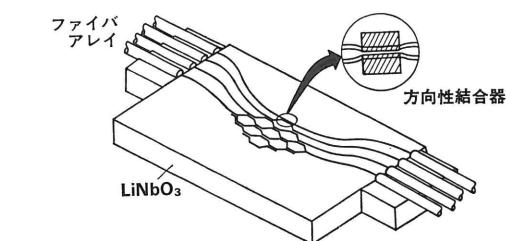
図 14 光ファイバカップラ

以上コヒーレント光伝送方式用光部品の研究開発状況を述べた。ファイバ形や導波形の光部品が活躍の場を得たという感じがする。方式側との協力の下に部品開発の促進が期待される。

4. 光交換システム用光部品

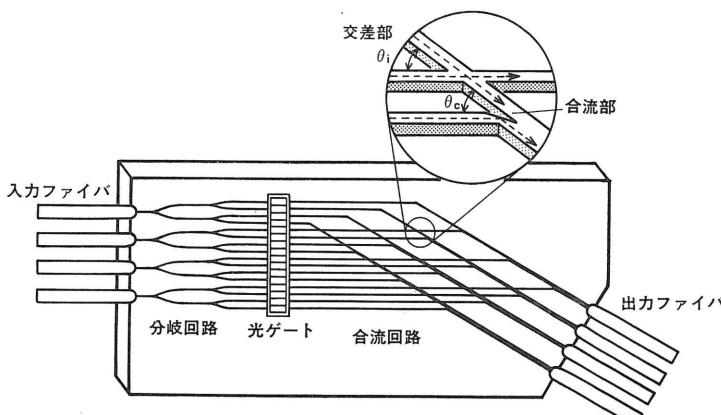
光交換の研究が活発になっている。その狙いは、光の広帯域性、高速性、無誘導性などを利用して、電子回路による交換では得られない機能や性能の実現にある。

光交換では、空間分割方式、時分割方式、波長分割方式が提案されている。空間分割光交換は光偏向スイッチあるいは光 ON/OFF ゲートを基本素子とするもので、低速光スイッチ ($\sim \mu s$) が使えることや切替接続を終了した後はスイッチ網がたんなる伝送路になるためきわめて広帯域が期待されるなどの特長がある。時分割光交換は超高速光偏向（またはゲート）スイッチと光メモリ（または光遅延回路）を基本素子とするもので、その特長は交換網構成のスイッチ素子数が少なく、また網構築に柔軟性があることである。波長分割光交換は波長変換素子と可変波長分波素子を基本素子とするもので、低速

図 15 完全格子 4×4 光マトリクススイッチ

光スイッチでよいことやスイッチ素子数が少ないという特長がある。

空間分割用の光スイッチでは、プリズムを用いた機械式のものから LiNbO_3 導波形方向性結合器のものまで多くの研究がなされている。ここでは、最近マトリクス化が進んだ例として、 LiNbO_3 光導波路を使った 4×4 光スイッチと光ゲートを使った光スイッチを紹介するにとどめる。 LiNbO_3 4×4 マトリクススイッチの構成を図 15 に示す⁴⁶⁾。これは 16 個の方向性結合器型光スイッチをマトリクス化しており、任意の入力端と空き出力端がかならず接続できる完全格子スイッチになっている。このように多数の光スイッチを集積化できるようになつたことは注目される。特性は、波長 $1.3 \mu\text{m}$ 、ファイバピックティル付きの挿入損 $3 \sim 6 \text{ dB}$ 、クロストーク $-12 \sim -20 \text{ dB}$ である。図 16 は 4×4 光ゲートマトリクススイッチの構成である⁴⁷⁾。導波形光分歧・合流回路の間に半導体光ゲート⁴⁸⁾を挿入した構成である。このスイッチは同時多接続機能があり、同一の画像信号を多数の端末に分配するのに有用である。このスイッチは分岐によって光信号レベルが $1/N$ に減少するが、将来は光増幅器で補償することによって全光化されたスイッチが可能である。現在の特性は、波長 $1.3 \mu\text{m}$ 、ファイバピックティ

図 16 4×4 光ゲートマトリクススイッチ

ル付きの挿入損 23 dB, クロストーク -13 dB である。空間分割用光スイッチは方式実験ができる段階に近づきつつあるが、さらにマトリクスの大規模化、挿入損・クロストークの低減が必要である。

時分割用光スイッチでは、 4×4 LiNbO₃ 導波形光スイッチ（スイッチ素子 5 個集積）と双安定レーザーダイオードメモリにより、伝送速度 256 Mb/s の 4 チャネル交換実験が行なわれている⁴⁹⁾。また、半導体光ゲートと光ファイバ遅延線を使った伝送速度 256 Mb/s, 4 チャネル光スイッチも報告されている⁵⁰⁾。時分割光交換が電子回路による時分割交換に打ち勝つためには数 Gb/s 以上の速度をもつ光メモリの開発が不可欠である。

波長分割用光スイッチは、波長変換素子、可変波長分波素子とも具体的な成果がない状況である。しかし、このスイッチは光に獨得の波長を利用している点で興味深い。

光交換は、光コンピュータなどの光情報処理と共に多くの技術が多く、今後は両者の間で協力関係を保ちながら研究開発が進むものと思われる。

5. おわりに

光通信用光部品をバルク形、ファイバ形、導波形という形態でとらえ、最近の話題を紹介した。

新しい光通信方式の実現には新しい光部品が不可欠であり、部品側ではファイバ形および導波形の光部品で応えようとしている。ファイバ形はコヒーレント光伝送で、また導波形は LAN やコヒーレント光伝送で使用実績を示しつつある。これらの新しい形態の光部品は実用化に向かって確かな一步を踏み出したようであり、今後の進展が期待される。

文 献

- 1) H. Fukutomi: "Fiber systems towards INS," IOOC-ECOC, Vol. II (1985) pp. 149-156.
- 2) 島田禎吾、中川清司: "商用サービスに入った 400M ビット/秒の日本縦貫光ファイバ伝送システム", 日経エレクトロニクス, 4 月 8 日号 (1985) 185-203.
- 3) 西原 浩、春名正光、栖原敏明: 光集積回路 (オーム社, 1985).
- 4) 橋本国生、鈴木信雄、米田悦吾、永田洋一、岩原保幸: "中小容量および局内光伝送方式用光回路部品", 通研実報, 30 (1981) 2323-2339.
- 5) 猿渡正俊、鈴木信雄、杉江利彦: "単一モードファイバ用光回路", 通研実報, 32 (1983) 675-688.
- 6) 日比谷孟俊: "光通信用アイソレーター", 応用物理, 55 (1986) 109-114.
- 7) H. Ishio, J. Minowa and K. Nosu: "Review and status of wavelength-division multiplexing technology and its application," J. Lightwave Technol., LT-2 (1984) 448-463.
- 8) G. Winzer: "Wavelength multiplexing components—A review of single-mode devices and their applications," J. Lightwave Technol., LT-2 (1984) 369-378.
- 9) C. B. Su, V. Lanzisera, R. Olshansky, W. Powazinik, E. Meland, J. Schlafer and R. B. Lauer: "15 GHz direct modulation bandwidth of vapour-phase regrown 1.3 μm InGaAsP buried-heterostructure lasers under CW operation at room temperature," Electron. Lett., 21 (1985) 577-579.
- 10) J. Schlafer, C. B. Su, W. Powazinik and R. B. Lauer: "20 GHz bandwidth InGaAs photodetector for microwave optical transmission," IOOC-ECOC, Vol. I (1985) pp. 533-536.
- 11) S. K. Korotky, et al.: "4-Gb/s transmission experiment over 117 km of optical fiber using a Ti:LiNbO₃ external modulator," J. Lightwave Technol., LT-3 (1985) 1027-1030.
- 12) N. A. Olsson, J. Hegarty, R. A. Logan, L. F. Johnson, K. L. Walker and L. G. Cohen: "Transmission with 1.37-Tbit·km/sec capacity using ten wavelength division multiplexed lasers at 1.5 μm ," OFC, WB 6 (1985).
- 13) I. Yamashita and M. Koyama: "Optical fiber subscriber systems," JARECT Vol. 17 Optical Devices & Fibers, ed. Y. Sueyatsu, (OHMSHA LTD and North-Holland Publishing Co., 1985) pp. 298-309.
- 14) 岩橋栄治、福富秀雄、ほか: "特集 広帯域専用および閉域加入者光伝送方式", 通研実報, 33 (1984) 409-597.
- 15) 加藤邦治、藤井洋二: "小形 LED コリメータを用いた波長多重受信モジュール", 昭和 60 年電子通信学会半導体・材料部門大会, 1-185 (1985).
- 16) M. Kawachi, Y. Yamada, M. Yasu and M. Kobayashi: "Guided-wave optical wavelength-division multi/demultiplexer using high-silica channel waveguides," Electron. Lett., 21 (1985) 314-315.
- 17) J. Minowa, N. Tokura and K. Nosu: "Development of fiber-optic local area networks in Japan," J. Lightwave Technol., LT-3 (1985) 438-447.
- 18) S. Matsushita, K. Kawai and H. Uchida: "Fiber-optic devices for local area network application," J. Lightwave Technol., LT-3 (1985) 544-555.
- 19) Y. Fujii, N. Suzuki and J. Minowa: "A 100 input/output-port star coupler composed of low-loss slab-waveguide," IOOC, 29C2-4 (1983).
- 20) S. Ohshima, T. Ito, K. Donuma and Y. Fujii: "Small low-deviation tapered fibre star coupler with mixer rod," Electron. Lett., 20 (1984) 976-978.
- 21) M. Kawachi, M. Yasu, Y. Yamada and M. Kobayashi: "High-silica glass channel optical waveguides on silicon," ICO-13 (1985) pp. 374-375.
- 22) E. Okuda, H. Wada and T. Yamasaki: "Optical access and star coupler composed of planar gradient-index glass waveguide," IOOC-ECOC, Vol. I (1985) pp. 423-426.
- 23) 野須 潔: "光波通信システムの展望", 昭和 60 年電気・情報関連学会連合大会, 分冊 4 (1985) pp. 4-94-4-97.
- 24) K. Inoue, H. Toba and K. Nosu: "Tunable optical multi/demultiplexer for optical FDM transmission system," Electron. Lett., 21 (1985) 387-389.
- 25) H. Toba, K. Inoue and K. Nosu: "450 Mbit/s optical frequency-division-multiplexing transmission with an 11 GHz channel spacing," Electron. Lett., 21 (1985) 656-657.

- 26) T. Okoshi: "Recent advances in coherent optical fibre communication systems," *IOOC-ECOC*, Vol. II (1985) pp. 73-80.
- 27) R. C. Booth: "Integrated optic devices for coherent transmission," *IOOC-ECOC*, Vol. II (1985) pp. 89-96.
- 28) 山本喜久, 斎藤茂, 左貝潤一: "コヒーレント光伝送", 電子通信学会誌, **67** (1985) 990-998.
- 29) R. C. Hooper, J. E. Midwinter, D. W. Smith and I. W. Stanley: "Progress in monomode transmission techniques in the United Kingdom," *J. Lightwave Technol.*, **LT-1** (1983) 596-610.
- 30) T. Matsumoto, K. Iwashita and T. Imai: "400 Mb/s long-span optical FSK transmission experiment at 1.5 μm ," *IOOC-ECOC*, Vol. III (1985) pp. 31-34.
- 31) 小松啓郎, 近藤充和, 江村克己, 山崎俊太郎, 鹿田 實, 太田義徳: "高速・低損失 LiNbO₃導波型光位相変調器", 昭和 60 年電子通信学会全国大会, 4-82 (1985).
- 32) T. Hosaka, Y. Sasaki, J. Noda and M. Horiguchi: "Low-loss and low-crosstalk polarisation-maintaining optical fibres," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 920-921.
- 33) R. A. Harmon: "Polarisation stability in long lengths of monomode fibre," *Electron. Lett.*, **18** (1982) 1058-1060.
- 34) 今井崇雅, 柳本貫至: "單一モードファイバの偏波伝送特性", 昭和 59 年電子通信学会全国大会, 4-210 (1984).
- 35) T. Imai, K. Nosu and H. Yamaguchi: "Optical polarisation control utilising an optical heterodyne detection scheme," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 52-53.
- 36) R. Ulrich: "Polarization stabilization on single-mode fiber," *Appl. Phys. Lett.*, **35** (1979) 840-842.
- 37) Y. Kidoh, Y. Suematsu and K. Furuya: "Polarization control on output of single-mode optical fibers," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-17** (1981) 991-994.
- 38) R. C. Alferness and L. L. Buhl: "Low loss, wavelength tunable, waveguide electro-optic polarization controller for $\lambda=1.32 \mu\text{m}$," *Appl. Phys. Lett.*, **47** (1985) 1137-1139.
- 39) T. Okoshi, Y. H. Cheng and K. Kikuchi: "New polarisation-control scheme for optical heterodyne receiver using two Faraday rotators," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 787-788.
- 40) H. C. Lefevre: "Single-mode fibre fractional wave devices and polarisation controllers," *Electron. Lett.*, **16** (1980) 778-780.
- 41) T. Matsumoto and H. Kano: "Endlessly rotatable fractional-wave devices for single-mode-fibre optics," *Electron. Lett.*, **22** (1986) 78-79.
- 42) T. Okoshi, N. Fukaya and K. Kikuchi: "New polarisation-state control device: Rotatable fibre cranks," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 895-896.
- 43) G. Georgiou and A. C. Boucouvalas: "Low-loss single-mode optical couplers," *IEE Proc.*, **132**, Pt. J (1985) 297-302.
- 44) 河内正夫: "ファイバー形光回路作製技術", *O puls E*, No. 60 (1984) 84-89.
- 45) M. J. F. Digonnet and H. J. Shaw: "Analysis of a tunable single mode optical fiber coupler," *IEEE J. Quantum. Electron.*, **QE-18** (1982) 746-754.
- 46) L. McCaughan and G. A. Bogert: "4×4 strictly nonblocking integrated Ti: LiNbO₃ switch array," *OFC*, TUQ 20 (1985).
- 47) M. Kobayashi, A. Himeno and H. Terui: "Guided-wave optical gate matrix switch," *IOOC-ECOC*, Vol. III (1985) pp. 73-76.
- 48) M. Ikeda: "Switching characteristics of laser diode switch," *IEEE J. Quantum Electron.*, **QE-19** (1983) 157-164.
- 49) S. Suzuki, T. Terakado, K. Komatsu, K. Nagashima, A. Suzuki and M. Kondo: "An experiment on high-speed optical time-division switching," *IOOC-ECOC*, Vol. III (1985) pp. 69-72.
- 50) T. Matsunaga and M. Ikeda: "Experimental application of LD switch modules to 256 Mbit/s optical time switching," *Electron. Lett.*, **21** (1985) 945-946.